



Imagerie multi-fréquentielle d'un réservoir géothermal au Lamentin (Martinique, France) par méthode de Longue Electrode Mise-à-la-Masse

Pierre Wawrzyniak, Jean-Francois Girard, Nicolas Coppo, François
Bretaudeau, Bernard Bourgeois

► To cite this version:

Pierre Wawrzyniak, Jean-Francois Girard, Nicolas Coppo, François Bretaudeau, Bernard Bourgeois. Imagerie multi-fréquentielle d'un réservoir géothermal au Lamentin (Martinique, France) par méthode de Longue Electrode Mise-à-la-Masse. XIII journées scientifiques de l'AGAP qualité, Nov 2015, Grenoble, France. hal-01258305

HAL Id: hal-01258305

<https://hal.science/hal-01258305>

Submitted on 18 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Imagerie multi-fréquentielle d'un réservoir géothermal au Lamentin (Martinique, France) par méthode de Longue Electrode Mise-à-la-Masse

Wawrzyniak P.¹, Girard JF.^{1,2}, Coppo N.¹, Bretaudeau F.¹, Bourgeois B.¹

1-BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) p.wawrzyniak@brgm.fr

2-Now at EOST (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Strasbourg, France)

Abstract: Within the frame of geothermal exploration, a CSEM survey was performed at the Le Lamentin area (Martinique, French Indies) using 400m long energized metallic casings of two deep exploration boreholes as long electrodes for current injection (the so-called double Longue Electrode Mise-à-la-Masse setup, hereafter 2xLEMAM). Apparent resistivity maps were derived from the in-phase electric fields. Frequency dependent apparent resistivity maps and profiles reveal a very conductive area north of the Fort de France Bay connected to a known poly-phased geothermal system and shallow salt water intrusion. The most conductive body is proposed to be the geo-electrical signature of an active hydrothermal system, superimposed on the signature of a conductive fossilized geothermal system. It is spatially well correlated with high temperature borehole logs.

Introduction

La résistivité électrique est un paramètre clé pour l'exploration géothermale (Muñoz., 2014). Dans le cas de l'imagerie profonde, la méthode magnétotellurique (sources naturelles) est communément utilisée en raison de sa grande profondeur d'investigation. Mais en milieu urbain, les mesures MT sont polluées par des sources de bruits anthropiques et l'utilisation d'une source contrôlée est alors nécessaire. Si la distance entre source et récepteur est inférieure à la longueur d'onde des ondes électromagnétiques, les données ne peuvent pas être traitées en utilisant la théorie de la magnétotellurique à source contrôlée (CSMT) : on parle alors d'électromagnétisme à source contrôlée (CSEM). Dans le but de maximiser l'amplitude du signal source et la profondeur d'investigation, nous utilisons les casings métalliques de forages existants comme électrodes d'injection. En effet, leur géométrie et leur faible résistance de contact permettent d'injecter des courants de fortes intensités directement aux profondeurs d'investigation.

L'usage des tubages métalliques de forages comme longues électrodes (dispositif LEMAM, i.e. Longue Electrode Mise-à-la-Masse) dans le cadre de l'exploration géothermale a déjà été réalisé par le BRGM en Guadeloupe (Bourgeois *et al.* (1983)). Une revue historique de la méthode LEMAM peut être lue dans Bourgeois *et al.*, (2010).

Cet article présente une application de la méthode CSEM utilisant un dispositif dit « double LEMAM » pour l'exploration géothermale en Martinique. Le BRGM a conduit une campagne de mesure sur un champ géothermal potentiel à Le Lamentin dans le but de réaliser une imagerie de résistivité apparente (Coppo *et al.* (2014)). La zone d'étude étant fortement urbanisée (commune de Fort de France et présence de l'aéroport international Aimé Césaire), le niveau de bruit anthropique est très élevé et rend l'usage de la MT impossible.

Le prospect géothermal de Le Lamentin

Le Lamentin est localisé au Sud-Est de Fort-de-France et sur la partie centre-est de l'île de Martinique (Antilles françaises). Cette zone est une plaine alluviale bâtie sur un substratum volcanique et présente des accidents tectoniques NE-SW et NW-SE (Westercamp *et al.* (1990); Mas *et al.* (2003), voir figure 1). Elle est considérée comme un système hydrothermal polyphasé, dont l'activité récente se limite à la partie nord de son extension historique, dont (Mas *et al.* (2003) et Chovelon (1984a, b)). Une campagne de gradient thermique (conduite par EURAFREP, Surcin., 1967) de 12 sondages (numérotés de La-1 à la 12 et allant jusqu'à 150m de profondeur, voir figure 1) a révélé une zone de fortes températures (de 83 à 93°C) sur l'axe structural NW-SE, corrélée avec l'émergence de sources chaudes (Sanjuan *et al.* (2002) ; Gadalia *et al.* (2013)). 4 forages profonds ont également été réalisés sur la zone : les forages Carrère et Desgras aux faibles températures (<50°C), équipés de tubages métalliques et utilisés dans cette étude, et les forages Californie et LA-101, aux températures maximales supérieures (respectivement 87°C at 450 m et 92°C at 230 m).

En raison de sa faible élévation, les sédiments superficiels de la plaine du Lamentin sont principalement saturés en eau de mer. Une campagne récente d'électromagnétisme transitoire héliportée (TEM) a permis de mettre en évidence des intrusions d'eau salée le long de la cote, associée à des corps conducteurs. L'analyse minérale des phases argileuses indique que la zone d'activité actuelle est dominée par la kaolinite alors que l'ancien système est dominé par des phases de smectite et de chlorite. Par conséquent le système fossile et le nouveau système géothermal ont une signature conductrice. De plus, la résistivité des fluides géothermaux en présence ($\sim 0.5 \Omega m$) présente peu de contraste avec celle de l'eau de mer (environ $0.3 \Omega m$).

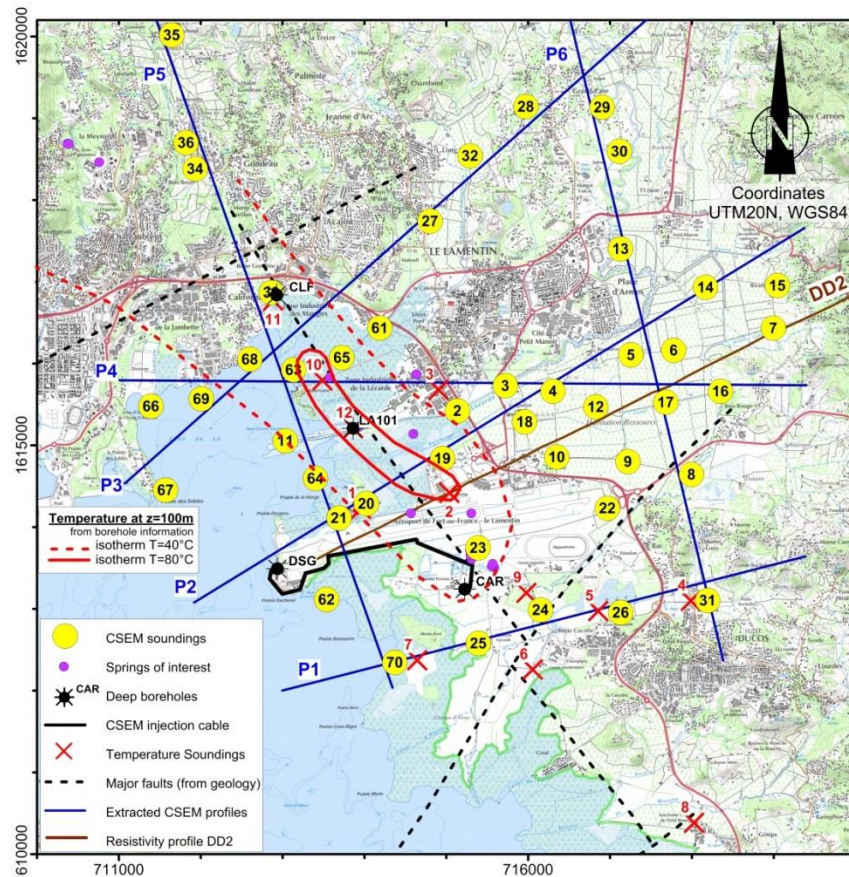


Figure 1: tiré de Wawrzyniak *et al.*, 2015. Carte du prospect du Lamentin. Légende: a) cercles jaunes : stations de mesures CSEM b) billes magentas : sources chaudes, c) étoiles noires : forages profonds Pointe Desgras (DSG), Carrère (CAR), La-101 et Californie (CLF), d) trait plein noir: câble d'injection, e) croix rouges : sondages de températures, f) tirets noirs : failles majeures d'après Westercamp *et al.* (1990), g) lignes bleues, profils P1 to P5 extraits des résultats CSEM, h) ligne marron: profil de résistivité électrique DD2 (Puvilland and Doré (1985)), i) lignes rouges : isotherme à $z=100m$ pour $T=40^{\circ}C$ (tirets) et $T=80^{\circ}C$ (trait plein) extrapolé d'après les sondages de températures (Gadalia *et al.* (2014))

Le jeu de données CSEM

La source CSEM utilisée est dite « double LEMAM » (notée 2xLEMAM). Des injections de courants (créneaux) à différentes fréquences fixes sont réalisées entre les forages Carrère (noté CAR, pôle +) et Desgras (noté DSG et pôle -, voir figure 1 pour la localisation), respectivement tubés de métal jusque 430m et 390m et reliés par un câble de 4km de long. Une source de marque METRONIX (TXB07 alimentée par un groupe électrogène 50kVA) est utilisée pour l'injection de courant successifs à 7 fréquences fondamentales (0.125Hz, 0.5 Hz, 2Hz, 8 Hz, 32 Hz, 128 Hz et 512 Hz). Les récepteurs sont des stations d'acquisition ADU de marque Metronix, enregistrant le champ électrique horizontal ($e_x(t), e_y(t)$) pendant une durée inférieure à 2 heures et synchrones de la source. 45 sites de mesures (cercle jaunes sur la figure 1) ont été investigués : 35 stations « terrestres » et 10 stations marines.

Les données sont alors traitées avec un code développé par le BRGM et nommé PROCATS (Bourgeois *et al.* (2012)):

les fonctions de transfert entre le signal enregistré au récepteur ($E_x(f)$, $E_y(f)$) et celui enregistré à la source $I(f)$ sont estimées pour chaque fréquence harmonique de la fréquence d'injection f_0 . On obtient alors des fonctions de transfert complexes dont les parties réelles et imaginaires sont respectivement les composantes en phase $\mathbf{E}_p(\mathbf{f})$, et en quadratures de la réponse électrique $\mathbf{E}_q(\mathbf{f})$ du sous-sol à une injection de courant. Les résultats sont alors présentés fréquence par fréquence sous forme de cartes de vecteurs de champs électriques (voir figure 2 pour $f=2\text{Hz}$, rouge= en phase, bleu = en quadrature) et confrontés à des résultats de modélisations (en noir=modélisations de champ $\mathbf{E}_p(\mathbf{f})$ associé à un milieu homogène).

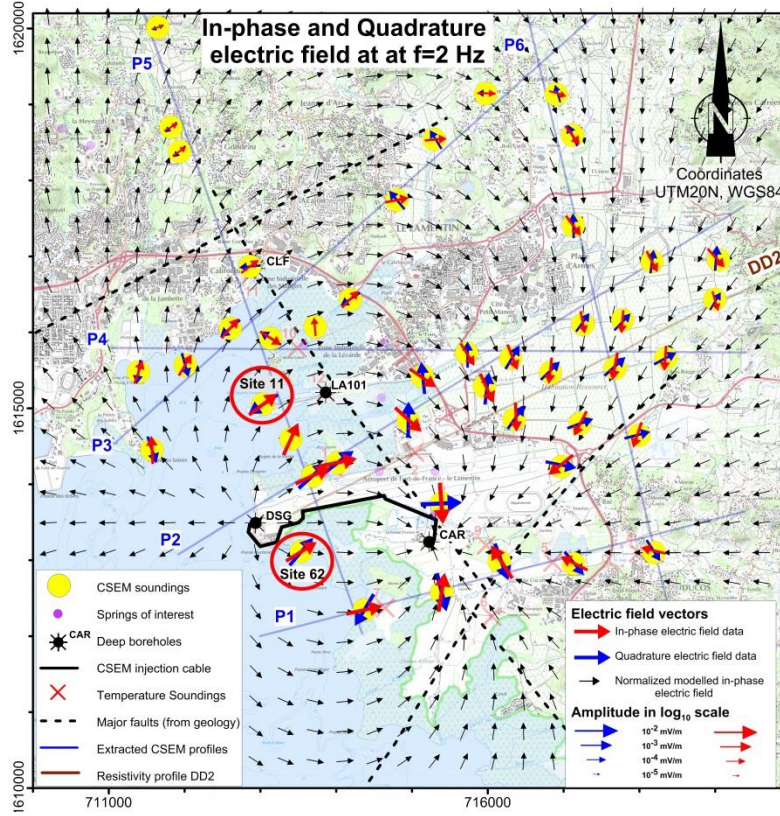


Figure 2: tiré de Wawrzyniak et al., 2015. Carte de champs en phase (flèches rouges) et en quadrature (flèches bleues) du champ électrique, normalisé par l'intensité du courant injecté, en échelle log10 d'après le traitement à la fréquence fondamentale $f=2\text{Hz}$ pour une fréquence d'injection $f_0=2\text{Hz}$. Flèches noires : champ électrique en phase modélisé pour un milieu homogène à 50ohm.m .

Cartographie de résistivité apparente

Enfin, ces données sont converties en carte de résistivité apparente iso-fréquence $\rho_a(P, f)$ (en $\Omega.m$) en utilisant la formule suivante :

$$\rho_a(P, f) = \frac{E_{in-phase}^{measured}(P, f)}{E_{in-phase}^{calculated at \rho=cste}(P, f)} * \rho(cste) \quad (2)$$

ou $E_{in-phase}^{measured}(P, f)$ est le champ en phase mesuré en un point P et ou $E_{in-phase}^{calculated at \rho=cste}(P, f)$ est le champ électrique en phase simulé pour un milieu homogène de résistivité ρ (voir Wawrzyniak et al., 2015 pour les détails).

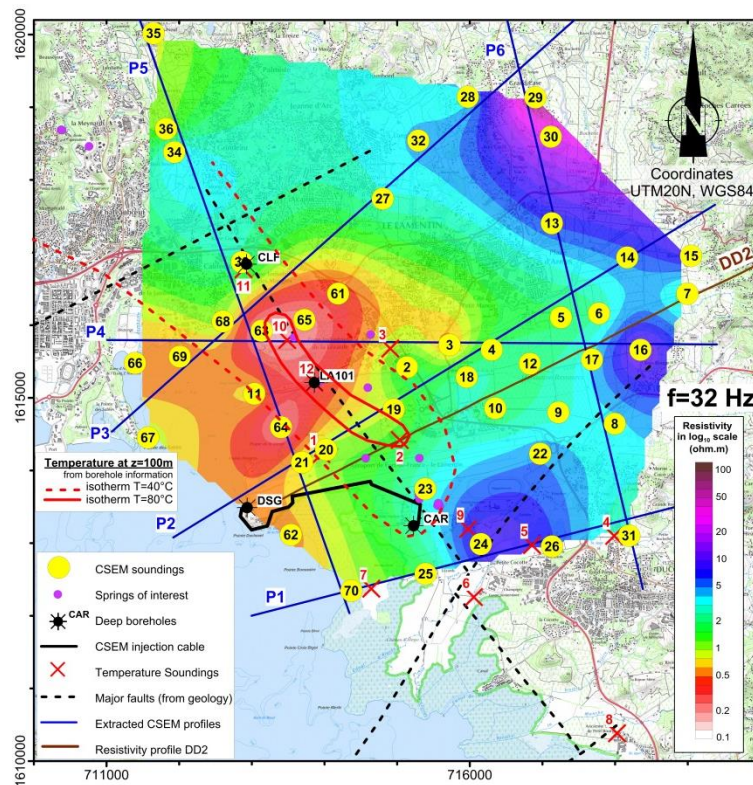


Figure 3: tiré de Wawrzyniak et al., 2015. Carte de résistivité apparente à 32 Hz, d'après le champ électrique en phase mesuré aux stations numérotées sur la carte (billes jaunes), pour une fréquence d'injection de 32 Hz, et une normalisation par un modèle 2xMAM à 400m de profondeur dans un milieu homogène à 5 Ω .met à la fréquence correspondante.

Les cartes de résistivité apparente obtenues présentent des variations latérales significatives: à 32Hz (voir figure 3), une anomalie conductrice est visible dans la zone Centre-Ouest de la carte, recoupant ainsi la zone définie par les isothermes à 100m de profondeur à 40°C et 80°C (en rouge sur les figure 1 et 3). A des fréquences plus faibles (non montré ici, voir Wawrzyniak et al., 2015), l'anomalie conductrice migre vers le nord entre les sondages La-10 et le forage Californie (noté CLF). Notons que cette anomalie est décorrélée du trait de côte. Des pseudo profils de résistivité apparentes (non montrés ici, notés P1 à P7) ont également été extraits et complètent la vision de l'anomalie.

Interprétation et conclusion

Cette anomalie de conductivité peut-être due à : i) la présence de fluides hydrothermaux et d'eau de mer dans des zones de haute perméabilité (fracturations, kaolinization et altération), ii) à une augmentation locale de la température (très forte corrélation spatiale entre zone chaude et faible conductivité), iii) à une augmentation de porosité associée à l'activité hydrothermale actuelle au contraire du système ancien, plus imperméable. Nous proposons que ce corp conducteur soit la signature géo-électrique d'un système hydrothermal actif, déjà mis en évidence par des sondages de températures ainsi que des observations hydrogéologiques et géochimiques.

Remerciements

Nous remercions le FEDER, l'ADEME, le conseil général de Martinique, le Syndicat Mixte d'Electricité de la Martinique (SMEM), et le fond MarTEM pour avoir financé ce projet. Les modélisations numériques ont été réalisées dans le cadre du projet IMAGE (Integrated Methods for Advanced Geothermal Exploration, European Union's Seventh Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement No: 608553).

Bibliographie

Bourgeois B., Charbonneyre P., Dore P. (1983) – Reconnaissance géothermique par prospection électrique sur le site de Bouillante (Guadeloupe), *BRGM report/ 83GPH097*

Bourgeois, B., & Girard, J. F. (2010). First modelling results of the EM response of a CO2 storage in the Paris Basin. *Oil & Gas Science and Technology–Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 65(4), 597-614.

Chovelon, P., 1984a. Cadre structural des minéralisations hydrothermales des prospectes du Lamentin et du Morne Rouge (Martinique), *BRGM report*, BRGM 84 SGN 326 GTH.

Chovelon, P., 1984b. Contexte géothermique des prospectes du Lamentin et du Morne Rouge (Martinique), *BRGM report* 84 SGN 003 GTH.

Coppo N., Baltassat J.-M., Girard J.-F., Jacob T., Martelet G., Mathieu F., Wawrzyniak P. (2014) – Exploration géophysique (magnétotellurique et gravimétrie) du potentiel géothermique de la Martinique (Montagne Pelée, Anses d'Arlet, Pitons du Carbet et Lamentin). *Final Report* BRGM/RP-62745-FR, 278 p., ill., 160 fig., 10ann..

Gadalia A., Rad S., Taïlame A.L. (2013) – Compléments d'exploration géothermique : volet hydrogéochimie. *BRGM report /RP-62710-FR*.

A. Gadalia, J.M. Baltassat, V. Bouchot, S. Caritg, N. Coppo, F. Gal, J.F. Girard, A. Gutierrez, T. Jacob, G. Martelet, S. Rad, A.L. Taïlame, H. Traîneau, B. Vittecoq, P. Wawrzyniak, C. Zammit (2013) – Compléments d'exploration géothermique en Martinique : conclusions et recommandations pour les zones de la Montagne Pelée, des Anses d'Arlet, des Pitons du Carbet et du Lamentin. *Final Report* BRGM/RP- -FR, 227 p, 75 fig., 7 tabl., 4 ann., 1 CD.

Mas, A., Patrier, P., Beaufort, D., & Genter, A. (2003). Clay-mineral signatures of fossil and active hydrothermal circulations in the geothermal system of the Lamentin Plain, Martinique. *Journal of volcanology and geothermal research*, 124(3), 195-218.

Muñoz, G. (2014). Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods. *Surveys in geophysics*, 35(1), 101-122.

Puvilland P., Doré P. (1985) - Reconnaissance géothermique par prospection électrique à la Martinique et à la Guadeloupe. *BRGM report/ 85SGN074GTH*

Sanjuan B., Genter A., Correia H., Girard J.P., Roig J.Y., Brach M. (2002) – Travaux scientifiques associés à la réalisation des trois puits d'exploration géothermique dans la plaine du Lamentin (Martinique). *BRGM report /RP-51671-FR*.

Surcin J. (1967) - Guadeloupe-Martinique. Mission géothermique 1967. *Rapport EURAFREP*, 71 p.

Wawrzyniak P., Girard J.F., Coppo N., Bourgeois B., Multi-frequency imaging using energized casings for geothermal exploration at Le Lamentin area (Martinique, Lesser Antilles, France), *submitted and in revision for Geophysical Prospecting*

Westercamp D., Pelletier B., Thibaut P.M., Traîneau H. (1990) - Carte géologique France à 1/50 000, feuille Martinique, Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières. *Notice explicative* par Westercamp D., Andreieff P., Bouysse P., Cottez S., Battistini R. (1989), 246 p.